Iranian Journal of Field Crops Research
Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

Research Article
Vol. 23, No. 1, Spring 2025, p. 91-108

Effects of Supplementary Irrigation and some Stress Modifiers (Vermicompost, Nano Iron Oxide, and Humic Acid) on Grain Filling Components, Nodulation and Grain Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) under Rainfed Conditions

R. Seyed Sharifi[1*], R. Seyed Sharifi[2]

1- Department of Plant Production and Genetics, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
2- Department of Animal Science, Faculty of Agriculture and Natural Resources, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran
(*- Corresponding Author Email: raouf_ssharifi@uma.ac.ir)

Received: 05 May 2024 Revised: 01 September 2024 Accepted: 5 September 2024 Available Online: 02 March 2025	**How to cite this article:** Seyed Sharifi, R., & Seyed Sharifi, R. (2025). Effects of Supplementary Irrigation and some Stress Modifiers (Vermicompost, Nano Iron Oxide, and Humic Acid) on Grain Filling Components, Nodulation and Grain Yield of Chickpea (*Cicer arietinum* L.) under Rainfed Conditions. *Iranian Journal of Field Crops Research*, *23*(1), 91-108. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.87923.1323

Introduction

Chickpea (*Cicer arietinum* L.) is an important pulse crop that also serves as a soil enhancer. Among the abiotic stresses, water deficit under rain-fed conditions limits crop production. In this regard, stress modifiers application (such as humic acid, nano iron oxide, and vermicompost) can decrease the effects of water deficit under rain-fed conditions and increase grain filling components, relative water content and quantum yield of plants. Iron (Fe) is an essential element in crop plants. Application of iron and humic acid alleviates drought effects due to enhancement in chlorophyll content, relative water content and nodulation in chickpea plants under stress. The aim of this study was to evaluate the effects of supplementary irrigation and stress modifiers (such as humic acid, nano iron oxide and vermicompost) on nodulation and yield of chickpeas under rain fed conditions.

Materials and Methods

A factorial experiment was performed at a farm near Ardabil city in 2023 using a RCBD with three replications. Experimental treatments were vermicompost (without application as control, application of 4 and 8 ton ha^{-1}), irrigation at two levels (rainfed as control and supplementary irrigation at the flowering stage) and application of humic acid and nano iron oxide (no application as control, application of humic acid, nano iron oxide, humic acid and nano iron oxide foliar application). The chickpea cultivar ‘Adel’ was planted with the optimal density of 35 $seeds.m^{-2}$. Vermicompost was prepared by Gilda Corporation and nano iron oxide from Pishgaman Nanomaterials Company. Application of nano iron oxide and humic acid was in two growth stages (vegetative growth and before flowering). In order to study the nodulation, three pots (with a diameter of 45 and depth of 60 cm) were sown in each plot before planting. The pots were removed at flowering and after washing, some traits like the number of inactive and active nodules were recorded. To investigate grain filling components, the first sampling was taken 14 days after podding and other samplings were taken in 5-days intervals to determine the accumulation of grain weight. The protein amount was calculated by multiplying the nitrogen content by 6.25. For the determination of grain yield, 0.5 m^2 were harvested in each plot.

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.87923.1323

Results and Discussion

The results showed that chlorophyll index, relative water content, quantum yield and number of pod per plant were significantly affected by the main effects of irrigation levels, vermicompost and humic acid. Also, irrigation levels×vermicompost×humic acid interactions had a significant effect on grain filling components (grain filling period; grain filling rate; effective grain filling period; maximum of grain weight) and grain yield. The results indicated that water deficit under rainfed conditions compared to supplementary irrigation at flowering stage led to a significant decrease in chickpea yield and yield components. However application of stress modulators (vermicompost, nano iron oxide and humic acid) and supplementary irrigation at flowering stage moderated the adverse effects of stress. Modulating effects of studied vermicompost, nano iron oxide and humic acid were emerged by physiological traits improvement (SPAD, quantum yield, grain filling components, number of active nodules and nodule dry weigh, and improvement of the water status (relative water content). The use of supplementary irrigation and stress modifiers (vermicompost, nano iron oxide and humic acid) increased grain filling rate (51.96%), grain filling period (62.5%) and effective grain filling period (44.61%) in compared to the no application of stress modifiers under rainfed condition. Application of vermicompost with nano iron oxide and humic acid increased number of active nodules (2.8 fold), nodule dry weigh (45%) and percentage of active nodules (2.3 fold) in compared to control (no application of stress modulators). Also, the application of stress modulators and supplementary irrigation at flowering stage had the highest efficiency in improving grain yield and led to 57% increase in grain yield compared to the no application of theirs under rain fed conditions.

Conclusion

Based on the results of this study, applying supplementary irrigation at flowering along with stress modifiers can enhance nodulation, grain filling components, and grain yield of chickpea under rainfed conditions.

Keywords: Cholorophyll index, Grain per pod, Quantum yield, Relative water content, Water limitation

نشریه پژوهشهای زراعی ایران

Homepage: https://jcesc.um.ac.ir

مقاله پژوهشی

جلد ۲۳، شماره ۱، بهار ۱٤۰٤، ص ۱۰۸-۹۱

تأثیر آبیاری تکمیلی و برخی تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، اسید هیومیک و نانواکسید آهن) بر اجزای پر شدن دانه، گره‌زایی و عملکرد نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم

رئوف سید شریفی[1]*، رضا سید شریفی[2]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵

چکیده

آبیاری تکمیلی و کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش (همانند ورمی‌کمپوست، اسید هیومیک و نانواکسید آهن) می‌تواند اثرات کمبود آب تحت شرایط دیم را کاهش داده و اجزای پر شدن دانه و گره‌زایی را در نخود (*Cicer arietinum* L.) دیم افزایش دهد. در این راستا، آزمایشی به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه‌ای در نزدیکی اردبیل در سال زراعی ۱۴۰۲ اجرا شد. فاکتورهای مورد بررسی کاربرد ورمی‌کمپوست در سه سطح (عدم استفاده به‌عنوان شاهد، کاربرد چهار و هشت تن در هکتار) و محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن در چهار سطح (محلول‌پاشی یک گرم در لیتر نانواکسید آهن، ۰/۲ گرم در لیتر اسید هیومیک، کاربرد توأم اسید هیومیک و نانواکسید آهن، عدم کاربرد به‌عنوان شاهد) و آبیاری در دو سطح (دیم به‌عنوان شاهد و انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی) را شامل می‌شدند. نتایج نشان داد که شاخص کلروفیل، محتوای نسبی آب، عملکرد کوانتومی و تعداد غلاف در بوته به‌طور معنی‌داری تحت اثرات اصلی سطوح آبیاری، ورمی‌کمپوست و اسید هیومیک قرار گرفتند. همچنین سطوح آبیاری × ورمی‌کمپوست × اسید هیومیک بر اجزای پر شدن دانه (سرعت پر شدن دانه، حداکثر وزن دانه، طول دوره و دوره مؤثر پر شدن دانه) و عملکرد دانه اثر معنی‌داری داشت. نتایج نشان داد که کمبود آب تحت شرایط دیم در مقایسه با آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی، منجر به کاهش معنی‌داری در عملکرد و اجزای عملکرد نخود شد. مقایسه میانگین‌ها نشان داد که استفاده از آبیاری تکمیلی و کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن)، سرعت پر شدن دانه (۵۱/۹ درصد)، طول دوره و دوره مؤثر پر شدن دانه (به‌ترتیب ۶۲/۵ و ۴۴/۶ درصد) و عملکرد دانه را (۵۷ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط دیم افزایش داد. کاربرد ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک، تعداد گره فعال (۲/۸ برابر)، وزن خشک گره (۴۵ درصد) و درصد گره فعال (۲/۳ برابر) را در مقایسه با سطح شاهد (عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک) افزایش داد. ازاین‌رو، با در نظر گرفتن نتایج این آزمایش، می‌توان اظهار داشت که استفاده از تعدیل‌کننده‌های تنش و آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی می‌تواند گره‌زایی، اجزای پر شدن دانه و عملکرد دانه نخود دیم را افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: دانه در نیام، شاخص کلروفیل، عملکرد کوانتومی، محتوای نسبی آب، محدودیت آبی

مقدمه

نخود (*Cicer arietinum* L.) یکی از منابع مهم پروتئین گیاهی، در بین حبوبات به‌دلیل قرارگیری در تناوب با سایر گیاهان زراعی از جمله غلات و برخورداری از ارزش غذایی بالا، از نظر سطح زیر کشت مقام اول را در کشور دارد (Sam Dalire, Seyed Sharifi, & Esmaelpour, 2010). اگرچه این گیاه به شرایط نیمه‌خشک سازگار است، ولی عملکرد آن در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک تحت شرایط دیم به دلایل مختلفی از جمله محدودیت آبی در مرحله گل‌دهی و رسیدگی (Talebi, Ensafi, Baghbani, Karami, & Mohammadi, 2013)، کمبود مواد آلی و عناصر ریزمغذی در خاک(DeSouza-Torres *et al.*, 2021)، بسیار پایین

۱- گروه تولید و ژنتیک گیاهی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

۲- گروه علوم دامی، دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

(*- نویسنده مسئول: Email: raouf_ssharifi@uma.ac.ir)

https://doi.org/10.22067/jcesc.2024.87923.1323

است. در این راستا، یکی از راه‌کارهای مؤثر در بهبود عملکرد گیاهان زراعی و تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی در مناطق نیمه‌خشک تحت شرایط دیم، انجام آبیاری تکمیلی در مواردی است که گیاه زراعی می‌تواند با بارندگی طبیعی به‌تنهایی رشد کند، ولی کاربرد اندازه محدودی آب در زمان توقف بارندگی یا در شرایط کمبود آب به‌ویژه خشکی آخر فصل رشد، موجب می‌شود تا آب کافی با تداوم رشد بوته‌ها به عملکردی پایدار و رضایت‌بخش در شرایط دیم منجر شود (Stone & Schlegel, 2006). سلطانی و همکاران (Soltani, Hajjar Pour, & Vadez, 2016) در بررسی عملکرد نخود دیم در پنج منطقه عمده اظهار داشتند که خلأ عملکرد ناشی از نبود یک دور آبیاری به‌میزان ۶۰ میلی‌متر در مرحله تشکیل اولین غلاف، می‌تواند عملکرد محصول را تا ۸۵ درصد کاهش دهد. توبابیسر و همکاران (Tubabicer, Narin Kolenderand, & Akar, 2004) نیز بیش‌ترین عملکرد دانه نخود را، در انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی گزارش کردند.

کاربرد برخی تعدیل‌کننده‌های تنش همانند ورمی‌کمپوست می‌تواند در بهبود رشد و عملکرد نخود مؤثر واقع شود. ورمی‌کمپوست از محتوای نیتروژن، فسفر، پتاسیم و قابلیت جذب بالایی از عناصر ریزمغذی نظیر روی و مس برخوردار است (Theunissen, Ndakidemi, & Laubscher, 2010) و کاربرد آن در شرایط محدودیت آبی، با افزایش توان نگهداری آب در خاک، در افزایش محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی مؤثر است (Heidarpour, Esmaielpour, Soltani Toolarood, & Khorramdel, 2020). سمیران و همکاران (Samiran, Kusum, Biman, & Ayanadar, 2010) افزایش معنی‌دار عملکرد دانه لوبیا (*Phaseolus Vulgaris*) را در کاربرد مقادیر مناسب کود کمپوست، به افزایش مواد مغذی به‌ویژه نیتروژن موجود در این کود نسبت دادند. نتایج یک بررسی نشان داد که کاربرد ۱۰ تن در هکتار ورمی‌کمپوست در شرایط تنش آبی، تعداد غلاف در بوته و عملکرد دانه لوبیا چشم بلبلی (*Vigna unguiculta*) را افزایش داد (Najarian, Ghonudi, Masoud Sinaki, & Valaei, 2016). در پژوهشی دیگر، کاربرد ورمی‌کمپوست موجب افزایش ۸۷ درصدی تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در غلاف لوبیا چیتی شد (Baluchi, Amini, Movahedi Dehnovi, & Atarzadeh, 2016). خسروی و همکاران (Khosravi, Daneshvar, Hosseini, & Mir, 2015) اظهار داشتند که افزایش مقادیر ورمی‌کمپوست مانع از ریزش اندام‌های زایشی و غلاف‌های جوان شده و تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در بوته نخود را افزایش می‌دهد. برخی پژوهشگران، افزایش عملکرد نخود در کاربرد ورمی‌کمپوست را به تأثیر این کود در توان جذب و نگهداری بالای رطوبت خاک و بهبود شرایط فیزیکی خاک (تهویه، سبکی خاک و نفوذپذیری) نسبت دادند (Jat & Ahlawat, 2006).

آهن یکی از عناصر ریزمغذی مؤثر در رشد بوده و در بیوسنتز کلروفیل و فتوسنتز نقش اساسی دارد (Irmak, Nuran Cıl, Yucel, & Kaya, 2012). کمبود این ریزمغذی در خاک‌های قلیایی نواحی خشک و نیمه‌خشک برخوردار از مقادیر بالایی از pH و کلسیم کربنات، به‌دلیل مشکل تثبیت و عدم جذب آهن شایع بوده (Fahad *et al.*, 2014) و محدودیت آبی با کاهش تحرک آهن در خاک، موجب می‌شود که گیاهان به‌طور فزاینده‌ای با کمبود این عنصر مواجه شوند. در این راستا، کاربرد آهن به‌خصوص به‌شکل نانو به‌دلیل سرعت جذب، انتقال و تجمع بیشتر این ذرات در مقایسه با فرم معمولی، یک راهکار مؤثر برای اصلاح کمبود آهن و بهبود عملکرد گیاهان به‌خصوص در شرایط تنش است (Kreslavskia *et al.*, 2023). محمدی و همکاران (Mohammadi, Roozrokh, & Talebi, 2015) اظهار داشتند که استفاده از آبیاری تکمیلی و نانواکسید آهن از تأثیر مثبت و معنی‌داری بر عملکرد دانه نخود برخوردار بود. مهربان (Mehraban, 2017) گزارش کرد که محلول‌پاشی آهن موجب افزایش تعداد دانه در بوته، عملکرد و پروتئین دانه عدس (*Lens culinaris*) شد. حمزه‌ای و همکاران (Hamzei, Seyedi, Azadbakht, & Fesahat, 2018) اظهار داشتند که محلول‌پاشی آهن ضمن بهبود وزن گره‌های ریشه و محتوای پروتئین دانه، موجب افزایش وزن هزار دانه، تعداد دانه در بوته و عملکرد دانه نخود شد.

اسید هیومیک یکی دیگر از ترکیبات مؤثر در بهبود مقاومت گیاهان در شرایط محدودیت آبی است که فضای مناسبی را برای موجودات داخل خاک و نفوذ بهتر هوا و آب در منطقه ریشه فراهم کرده (Ayas & Gulser, 2005) و با افزایش سرعت تقسیم سلولی و رشد بیشتر ریشه گیاه، می‌تواند اثر مخرب تنش خشکی را کاهش دهد (Maccarthy, 2001). ازآنجایی‌که گیاه نخود در آغاز گل‌دهی یک رشد سریع را طی می‌کند، فراهمی رطوبت در دسترس در طول دوره زایشی با افزایش فتوسنتز جاری و تشکیل گل‌های بیشتر در گیاه، بر افزایش تشکیل غلاف‌های بارور و تولید دانه مؤثر خواهد بود (Armin & Moslehi, 2012). در این زمینه، شیانی و آرمین (Shabani & Armin, 2017) اظهار داشتند که کاربرد اسید هیومیک به‌دلیل بهبود مقاومت گیاه در برابر کم‌آبی، در افزایش عملکرد و اجزای عملکرد نخود دیم مؤثر است. نتایج مشابهی نیز مبنی بر افزایش ارتفاع بوته، سطح برگ، عملکرد و محتوی نیتروژن، فسفر و پتاسیم دانه لوبیا چشم بلبلی با کاربرد اسید هیومیک گزارش شده است (El-Henfy, 2010).

محدودیت آبی در بیشتر مناطق خشک و نیمه‌خشک از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کاهش عملکرد نخود دیم محسوب می‌شود. در این راستا، اهمیت برخی از تعدیل‌کننده‌های تنش (اسید هیومیک، ورمی-

کمپوست و نانواکسید آهن) و انجام آبیاری تکمیلی در تعدیل اثرات ناشی از محدودیت آبی در نخود دیم و بررسی‌های محدود انجام‌شده در خصوص برهم‌کنش توأم این عوامل، موجب شد تا اثر آن‌ها بر عملکرد و برخی صفات زراعی و فیزیولوژیک در این گیاه مورد ارزیابی قرار گیرد.

مواد و روش‌ها

آزمایش به‌صورت فاکتوریل در قالب طرح پایه بلوک‌های کامل تصادفی در سه تکرار در مزرعه‌ای در نزدیکی اردبیل با مختصات جغرافیایی ۴۸ درجه و ۳۰ دقیقه طول شرقی و ۳۸ درجه و ۱۵ دقیقه عرض شمالی با ارتفاع ۱۳۵۰ متر از سطح دریا در سال زراعی ۱۴۰۲ اجرا شد. براساس طبقه‌بندی گوسن، اقلیم محل اجرای آزمایش از نوع نیمه‌خشک سرد بود. فاکتورهای مورد بررسی شامل کاربرد ورمی‌کمپوست در سه سطح (عدم استفاده به‌عنوان شاهد، کاربرد چهار و هشت تن در هکتار) و محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن در چهار سطح (عدم کاربرد به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی نانواکسید آهن، اسید هیومیک، کاربرد توأم اسید هیومیک و نانواکسید آهن) و آبیاری در دو سطح (شرایط دیم به‌عنوان شاهد و انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی) بود. عملیات تهیه زمین شامل شخم، دیسک و تسطیح در هفته اول اردیبهشت صورت گرفت. در مرحله بعدی تهیه جوی و پشته‌ها توسط فاروئر انجام شد. هر واحد آزمایشی شامل پنج ردیف سه متری با فاصله بین ردیفی ۵۰ سانتی‌متر بود. بین هر واحد آزمایشی حداقل سه ردیف نکاشت به‌منظور جلوگیری از اثر محلول‌پاشی و آبیاری تکمیلی به کرت‌های مجاور در نظر گرفته شد. در آخرین مرحله تهیه زمین و قبل از کاشت، به‌منظور تعیین اثر تیمارها بر گره‌زایی و وزن خشک گره، سه گلدان پلاستیکی به قطر ۴۵ سانتی‌متر در عمق ۶۰ سانتیمتری خاک که کف گلدان‌ها به‌منظور زهکشی سوراخ شده بود، در خطوط اصلی هر واحد آزمایشی با همان تراکم سایر ردیف‌های کاشت، قرار داده شد. نحوه کاشت و سایرعملیات زراعی در گلدان‌های پلاستیکی، مشابه سایر خطوط کاشت بود. کاشت در تاریخ ۱۳ اردیبهشت انجام شد. رقم مورد استفاده "عادل" بود. این رقم از تحمل مناسبی نسبت به سرمای ابتدای فصل برخوردار بوده و در مرحله چهار تا پنج برگی، گیاهچه‌ها به‌منظور اعمال تراکم مناسب (۳۵ بوته در مترمربع) تنک شدند. ازآنجاکه کاشت در مزرعه‌ای بود که سال قبل به کشت نخود اختصاص داده شده بود، ازاین‌رو عمل تلقیح بذر با *ریزوبیوم لگومینوزاروم* انجام نشد. برای تعیین ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی خاک، قبل از کاشت تا عمق ۴۰ سانتی‌متری، نمونه‌برداری انجام شد. ویژگی‌های خاکی و شرایط اقلیمی منطقه مورد کشت در جدول‌های ۱ و ۲ آورده شده است. ورمی‌کمپوست مصرفی در این آزمایش از شرکت گیلدا خریداری و قبل از کاشت براساس سطوح تعریف‌شده در هر واحد آزمایشی اعمال و مشخصات فیزیکوشیمیایی آن در جدول ۳ ارائه شده است. نانواکسید آهن از شرکت پیشگامان نانو مواد ایرانیان تهیه و مشخصات آن‌ها در جدول ۴ درج شده است. محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن در دو مرحله (در رشد رویشی BBCH 11 و قبل از گل‌دهی BBCH 54) انجام شد. فاصله زمانی بین محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن، چهار روز در نظر گرفته شد. نانواکسید آهن با غلظت یک گرم در لیتر و اسید هیومیک با غلظت ۰/۲ گرم در لیتر (۲۰۰ میلی‌گرم در لیتر براساس توصیه شرکت تولیدکننده) استفاده شد. اسید هیومیک مورد استفاده دارای۶۰ درصد اسید هیومیک، پنج درصد اسید فولویک ، یک درصد نیتروژن، یک درصد کلسیم، ۰/۱۵ درصد منیزیم، ۱۲درصد پتاسیم و ۰/۵ درصد آهن بود.

جدول ۱- خصوصیات فیزیکوشیمیایی خاک

Table 1- Soil physico-chemical characteristics

پتاسیم K	فسفر P	نیتروژن N	کربن آلی O.C	بافت Texture	شن Sand	لوم Loam	رس Clay	کلسیم کربنات $CaCO_3$	pH	عمق نمونه‌برداری Sampling depth
($mg.kg^{-1}$)		(%)			(%)					(cm)
192	9.02	0.063	0.55	رسی لومی	29	33	38	11.2	7.3	0-40

جدول ۲- مشخصات آب و هوایی در طول دوره رشدی نخود

Table 2- Climatic characteristics during growth of chickpea

پارامتر Parameter	فروردین Apr.	اردیبهشت May	خرداد Jun.	تیر Jul.	مرداد Aug.	شهریور Sep.
Rainfall (mm) بارندگی	8.4	76	36.8	3.5	2.2	9.2
Temperature mean (°C) میانگین دما	10.4	13.9	18.3	18.3	20.4	17.2
Sunny hours ساعات آفتابی	7	7.8	8.4	10.3	11.3	7.8
Relative humidity mean (%) متوسط رطوبت نسبی	63.8	65.6	69	66.6	55.4	72.8

جدول ۳- نتایج تجزیه ورمی‌کمپوست شرکت گیلدا

Table 3- Result of vermicompost analysis of Gilda corporation

مشخصه Characteristic	EC $(dS\ m^{-1})$	آهن Fe	منگنز Mn	مس Cu	روی Zn	سرب Pb	کادمیوم Cd	pH
		$(mg\ kg^{-1})$						
مقادیر Amount	1.12	5000	275	20	110	19	1	
مشخصه Characteristic	**مواد آلی Organic materials**	**کربن آلی Organic C**	**نیتروژن N**	**فسفر P**	**پتاسیم K**	**کلسیم Ca**	**منیزیم Mg**	7.64
			(%)					
مقادیر Amount	56.8	32.9	1.5	0.4	0.4	2.7	0.95	

جدول ٤- خصوصیات نانواکسید آهن

Table 4- Nono iron oxide characteristics

نانوذرات Nanoparticles	رنگ Color	خلوص Purity (%)	میانگین اندازه ذرات Average particle size (nm)	سطح ویژه ذرات Surface of particles specific
نانواکسید آهن Nano iron oxide	پودری قرمز Red powder	99	<30	>30 $m^2.g^{-1}$

عملکرد کوانتومی[1]، شاخص کلروفیل و محتوای نسبی آب، دو هفته بعد از مرحله گل‌دهی از خطوط اصلی هر واحد آزمایشی به‌طور تصادفی بر روی شش برگ توسعه‌یافته با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ایی، اندازه‌گیری شد. در این راستا، شاخص کلروفیل با استفاده از دستگاه کلروفیل‌سنج (SPAD-502 مینولتای ژاپن) و عملکرد کوانتومی توسط دستگاه فلورسانس کلروفیل (مدل OS-30p، شرکت OPTI SCIENCES، آمریکا) در هر واحد آزمایشی بعد از ۱۵ دقیقه تاریکی توسط کلیپس‌های مخصوص، در فاصله زمانی ساعت ۸-۱۰ صبح اندازه‌گیری شد (Kheirizadeh Arough, & Seyed Sharifi, 2018). برای اندازه‌گیری محتوای نسبی آب، برگ‌ها در فویل‌های آلومینیومی داخل کیسه‌های پلاستیکی و روی یخ قرار داده شده و به آزمایشگاه منتقل و با استفاده از رابطه پیشنهادی کوستوپولو و همکاران (Kostopoulou, Barbayiannis, & Basile, 2010) مقدار آن تعیین شد.

RWC = (FW -DW)/(TW -DW) ×100 (۱)

که در آن، RWC: محتوای نسبی آب، FW: وزن تر، TW: وزن آماس‌یافته و DW: وزن خشک است. ازآنجاکه مناسب‌ترین زمان برای ارزیابی گره‌زایی، مرحله گل‌دهی است، ازاین‌رو در این مرحله بوته‌های هر گلدان به همراه ریشه به‌طور کامل جدا شده و پس از شست‌وشوی ریشه‌ها، تعداد و وزن گره‌ها بعد از قرارگیری در آون به‌مدت ۴۸ ساعت در دمای ۵°±۷۰ شمارش شد (Namvar *et al.*, 2011). به‌منظور تعیین اجزای پر شدن دانه، ۱۴ روز پس از تشکیل غلاف در داخل خطوط اصلی هر واحد آزمایشی با در نظر گرفتن اثر حاشیه‌ای تعدادی بوته به ظاهر مشابه و یکنواخت انتخاب و با نخ رنگی علامت‌گذاری شد. در فواصل زمانی هر پنج روز یک بار و در هر مرحله از مراحل نمونه‌برداری، سه بوته مشابه و به ظاهر یکنواخت از بوته‌های علامت‌گذاری‌شده، انتخاب و پس از انتقال به آزمایشگاه، ابتدا دانه‌ها از غلاف جدا شده و سپس وزن خشک تک بذر از محاسبه وزن خشک کل به تعداد بذر برآورد شد (Ronanini, Savin, & Hal, 2004). برای برآورد و تفسیر اجزای مربوط به پر شدن دانه، از یک مدل رگرسیون خطی دو تکه‌ای براساس رویه DUD و دستورالعمل Proc Nlin نرم‌افزار SAS به‌صورت زیر استفاده شد (Soltani, 1998).

$$GW = \begin{cases} a + bt_0 & t<t_0 \\ a + bt & t>t_0 \end{cases} \qquad (۲)$$

که در آن، GW: وزن دانه، t: زمان، b: سرعت پر شدن دانه، t_0: پایان دوره پر شدن دانه و a: عرض از مبدأ است. این مدل، تغییرات وزن دانه نسبت به زمان را به دو مرحله تفکیک می‌کند: مرحله اول که در حقیقت مرحله خطی پر شدن دانه است، وزن دانه تا رسیدن به حداکثر مقادیر خود در زمان t_0 که در حقیقت زمان رسیدگی وزنی است، به‌صورت خطی افزایش پیدا می‌کند. شیب خط رگرسیون در این مرحله ($t< t_0$) سرعت پر شدن دانه را نشان می‌دهد. با برازش این مدل بر کلیه داده‌ها، ابتدا دو پارامتر مهم پر شدن دانه یعنی سرعت پر شدن دانه (b) و زمان رسیدگی وزنی (t_0) به‌دست آمده و سپس مقدار عددی t_0 در قسمت دوم رابطه (۲) قرار داده شد وGW که وزن دانه است محاسبه شد. برای تعیین دوره مؤثر پر شدن دانه از رابطه (۳) استفاده شد (Ellis & Pieta-Filho, 1992).

EFP=MGW/GFR (۳)

که در آن، EFP: دوره مؤثر پر شدن دانه (روز)، MGW: حداکثر وزن دانه (میلی‌گرم) و GFR: سرعت پر شدن دانه (میلی‌گرم در روز)

---

[1]- عملکرد کوانتومی یا حداکثر کارآیی کوانتومی فتوسیستم II از نسبت فلورسانس متغیر به فلورسانس حداکثر (F_v/F_m) به‌دست می‌آید.

است. برای براورد تعداد دانه در غلاف و تعداد غلاف در بوته از خطوط اصلی هر واحد آزمایشی با رعایت اثر حاشیه‌ای، شش بوته برداشت و میانگین آن‌ها به‌عنوان ارزش آن صفت در تجزیه داده‌ها استفاده شد. عملکرد دانه با برداشت از سطحی معادل ۰/۵ مترمربع از خطوط اصلی هر کرت بعد از حذف اثر حاشیه‌ای براورد شد. محتوای نیتروژن دانه به‌روش کجلدال تعیین و با ضرب در ضریب ۶/۲۵ درصد پروتئین دانه تعیین شد (Bakshi Moghadam, Mortazavi, Milani, & Hashemi, 2015). برای تجزیه داده‌ها از نرم‌افزار SAS نسخه ۹/۱ و برای رسم نمودارها از Excel و برای مقایسه میانگین‌ها از آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد استفاده شد.

نتایج و بحث

نتایج تجزیه واریانس نشان داد که برهم‌کنش تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست، اسید هیومیک و نانواکسید آهن) و سطوح آبیاری بر تمامی اجزای پر شدن دانه (همانند حداکثر وزن دانه، سرعت پر شدن، طول دوره و دوره مؤثر پر شدن دانه) در سطح احتمال یک درصد و بر عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). اثرات اصلی تعدیل‌کننده‌های تنش بر شاخص کلروفیل و محتوای نسبی آب در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد، ولی اثرات اصلی عملکرد کوانتومی تحت تأثیر سطوح ورمی‌کمپوست در سطح احتمال یک درصد و محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار شد. اثرات اصلی ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن و اثر ترکیب تیماری این دو عامل بر وزن خشک گره، تعداد گره فعال، تعداد گره غیرفعال و درصد گره فعال در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد. اثرات اصلی تعدیل‌کننده‌های تنش بر تعداد غلاف در بوته و محتوای پروتئین در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵).

جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن بر اجزای پر شدن دانه، عملکرد کمّی و کیفی و برخی صفات نخود در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

Table 5- Analysis of variance of the effects of vermicompost, nano iron oxide and humic acid on grain filling components, quantitative and qualitative yield and some traits of chickpea under rainfed and supplementary irrigation

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares							
		تعداد گره فعال NAN	وزن خشک گره NDW	درصد گره فعال PAN	تعداد گره غیرفعال NIN	شاخص کلروفیل SPAD	عملکرد کوانتومی FV/FM	محتوای نسبی آب RWC	حداکثر وزن دانه MGW
بلوک R	2	4.23 *	108.7 **	112.1**	5.7 **	75.3**	0.08**	411.81**	0.0093**
آبیاری I	1	2.26ns	0.91 ns	23.98	0.259 ns	778.8**	0.515**	1150**	0.0078**
ورمی کمپوست V	2	17.63**	938.4**	934.3**	39.9**	303.5**	0.206**	277.2**	0.00511**
آهن و اسید هیومیک M	3	225**	6115 **	5842.7**	103.5**	27.94**	0.0119*	81.59**	0.0123**
V × I	2	0.95 ns	4.04 ns	4.53	1.01 ns	0.393 ns	0.0026 ns	0.569 ns	0.00307**
I × M	3	1.04 ns	24.2 ns	4.85	1.12 ns	1.027 ns	0.00021 ns	0.355 ns	0.00075ns
M × V	6	2.77*	43.7 **	38.66**	3.46**	0.208ns	0.000054 ns	3.61 ns	0.00467**
V × I × M	6	0.58	4.6 ns	1.79	0.237 ns	0.585 ns	0.000068 ns	0.54 ns	0.00306*
خطا Erro	46	0.93	12.3	7.46	0.596	1.82	0.003	18.48	0.00022
درصد ضریب تغییرات C.V (%)	-	10	5.8	4.6	12.5	3.8	8.3	6.1	6.4

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

NAN تعدادگره فعال، PAN: درصد گره فعال، NIN: تعداد گره غیرفعال، SPAD: شاخص کلروفیل، FV/FM: عملکرد کوانتومی، RWC: محتوای نسبی آب، NDW: وزن خشک گره، MGW: حداکثر وزن دانه

ns, * and **: are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

I: Irrigation; V: Vermicompust; M: foliar application of humic acid and nano iron oxide; NAN: number of active noudules; NDW: noudules dry weight; PAN: percentage of active noudles; NIN: number of inactive noudules; SPAD: cholorophyll index; FV/FM: quantum yield; RWC: relative water content; MGW: maximum of grain weight

ادامه جدول ۵- تجزیه واریانس تأثیر ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن بر اجزای پر شدن دانه، عملکرد کمّی و کیفی و برخی صفات نخود در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

Continued Table 5- Analysis of variance of the effects of vermicompost, nano iron oxide and humic acid on grain filling components, quantitative and qualitative yield and some traits of chickpea under rainfed and supplementary irrigation Continue

منابع تغییر S.O.V	درجه آزادی df	میانگین مربعات Mean squares						
		طول دوره پر شدن دانه GFP	سرعت پر شدن دانه GFR	دوره مؤثر پر شدن دانه EGFP	دانه در غلاف NGP	غلاف در بوته NPP	عملکرد دانه GY	محتوای پروتئین PC
بلوک (R)	2	99.43**	0.000021**	41.62**	0.076 ns	1.41ns	23892.2**	24.4**
آبیاری (I)	1	36.07**	0.0000092**	50.01**	0.12 ns	235.9**	90212.6**	37.8**
ورمی کمپوست (V)	2	28.54**	0.000004 **	12.15**	0.003 ns	97.9**	55772.7**	64.5**
آهن واسید هیومیک (M)	3	47.04**	0.000006**	17.8**	0.054 ns	116.3**	78771.1**	68.6**
V × I	2	20.81**	0.000003**	1.244*	0.025 ns	1.29ns	1583.8**	0.1ns
I × M	3	12.98**	0.000001 **	1.79*	0.025 ns	1.04ns	367.1ns	1.5 ns
M × V	6	12.15**	0.0000022**	1.17*	0.023 ns	0.58ns	1328**	0.16 ns
V × I × M	6	10.36**	0.00000187**	0.918*	0.025 ns	0.074ns	624.5*	0.13 ns
خطا Erro	46	1.93	0.0000003	0.429	0.039	2.55	255.6	1.52
درصد ضریب تغییرات C.V (%)	-	4.3	4.4	3.2	8.4	10.5	12.1	7.1

ns، * و **: به‌ترتیب غیرمعنی‌دار و معنی‌دار در سطح احتمال پنج و یک درصد

PC: محتوای پروتئین، NPP: تعداد غلاف در بوته، NGP: تعداد دانه در غلاف، EGFP: دوره مؤثر پرشدن دانه، GFR: سرعت پرشدن دانه، GFP: طول دوره پر شدن دانه، GY: عملکرد دانه

ns, * and **: are non-significant, significant at P≤0.05 and P≤0.01, respectively.

GFP: grain filling period; GFR: grain filling rate; EGFP: effective grain filling period; NGP: number of grain per plant; NPP: number of pod per plant; GY: grain yield; PC: protein content

گره‌زایی (تعداد گره فعال، تعداد گره غیرفعال، وزن خشک گره و درصد گره فعال): اثرات اصلی سطوح مختلف ورمی‌کمپوست، محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک و اثر ترکیب تیماری این دو عامل بر تعداد گره فعال، تعداد گره غیرفعال، وزن خشک گره و درصد گره فعال در سطح احتمال یک و پنج درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). در بین سطوح مختلف ورمی‌کمپوست، بیشترین تعداد گره غیرفعال (۷/۴ گره غیرفعال به‌ازای هر بوته) در حالت عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و کمترین آن (۴/۹ عدد به‌ازای هر بوته) در بالاترین سطح از کاربرد ورمی‌کمپوست به دست آمد (جدول ۶). روند مشابهی نیز در محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک به دست آمد. به‌طوری‌که بالاترین تعداد گره غیرفعال (نه عدد به‌ازای هر بوته) در عدم کاربرد نانواکسید آهن و اسید هیومیک و کمترین آن (۳/۴ عدد به‌ازای هر بوته) در محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک به دست آمد (جدول ۶). مقایسه میانگین اثر ترکیب تیماری کاربرد ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک نشان داد که بیشترین تعداد گره غیرفعال (۱۱/۴ عدد به‌ازای هر بوته) در عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک به دست آمد که در مقایسه با کاربرد مقادیر بالایی از ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک از افزایش ۲/۸ برابری برخوردار بود (جدول ۷). بیشترین تعداد گره فعال، وزن خشک گره و درصد گره فعال (به‌ترتیب ۱۰/۵ گره در بوته، ۶۶/۴ میلی‌گرم در بوته و ۶۵/۳ درصد) در کاربرد مقادیر بالایی از ورمی‌کمپوست به دست آمد که در مقایسه با عدم کاربرد آن به‌ترتیب از افزایش ۲۰، ۲۳/۱ و ۶/۴ درصدی برخوردار بود. همچنین محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک از افزایش به‌ترتیب ۱/۷، ۱/۲۱ و ۱/۲ برابری تعداد گره فعال، وزن خشک گره و درصد گره فعال در مقایسه با سطح شاهد برخوردار بود (جدول ۶). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که کاربرد توأم ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک، تعداد گره فعال (۲/۸ برابر)، وزن خشک گره (۴۵ درصد) و درصد گره فعال (۲/۳ برابر) را در مقایسه با سطح شاهد (عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک) افزایش داد (جدول ۷). به‌نظر می‌رسد که بالا بودن دمای محیط در طول دوره رشدی گیاه و کمی نزولات حاکم بر شرایط دیم (جدول ۲) به‌دلیل کاهش کلروفیل و عملکرد کوانتومی (جدول ۶)، ضمن کاهش فتوسنتز و تجمع مواد محلول، موجب کاهش تعداد گره‌های فعال و افزایش تعداد گره‌های غیرفعال در ریشه می‌شود،

چراکه در اثر محدودیت آبی، میزان فتوسنتز و مواد حاصل از فتوسنتز کاهش می‌یابد و این امر موجب کاهش تجمع مواد محلول و در نتیجه، کاهش فعالیت گره‌های تثبیت‌کننده نیتروژن در ریشه می‌شود. نتایج مشابهی نیز توسط ابوالفضلی و همکاران (Abolfazli, Alikani, & Rejali, 2017) مبنی بر اینکه محدودیت آبی به‌دلیل کاهش دسترسی به جذب آب و عناصر و کاهش میزان فتوسنتز، تأثیر منفی بر تشکیل گره‌زایی دارد، گزارش شده است. البته به نظر می‌رسد که علت عدم تأثیرپذیری صفات مرتبط با گره‌زایی (اعم از تعداد گره فعال، تعداد گره غیرفعال، وزن خشک گره و درصد گره فعال) به‌واسطه انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی شاید به این دلیل بوده باشد که اوج تکامل و تشکیل گره در حبوباتی مانند نخود در مرحله گل‌دهی است (Namvar *et al*., 2011) و چون ارزیابی گره‌زایی در مرحله گل‌دهی بوده است، ازاین‌رو انجام آبیاری تکمیلی در این مرحله رشدی که قبل از آن گره‌ها به مرحله حداکثری تکامل و تشکیل خود رسیده‌اند، نتوانسته است اثر معنی‌داری بر این صفات داشته باشد، درحالی¬که کاربرد ورمی‌کمپوست در زمان کاشت و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و هیومیک در مراحل رشد رویشی و قبل از گل‌دهی، موجب شده است تا اثر این عوامل بر گره‌زایی، معنی‌دار شود (جدول ۵)، ازاین‌رو به نظر می‌رسد که کاربرد نانواکسید آهن و اسید هیومیک با کمک به تسهیل جذب عناصر کم‌مصرف مانند آهن به‌عنوان عنصر مؤثر در سنتز کلروفیل (Goos & Johnson, 2000)، و ورمی‌کمپوست با دارا بودن مقادیر بالایی از منیزیم، فسفر و نیتروژن (جدول ۳) و مؤثر در سنتز کلروفیل و افزایش شاخص کلروفیل (جدول ۶)، همچنین برخورداری از توان نگهداری بالای آب در خاک و افزایش محتوای نسبی آب (جدول ۶)، میزان فتوسنتز را افزایش داده و به تبع آن موجب بهبود فرایند گره‌زایی شده است (جدول ۶ و ۷).

شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی: مقایسه میانگین اثرات اصلی فاکتورهای مورد بررسی بر شاخص کلروفیل نشان داد که بیشترین مقدار این شاخص در آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی (۴۵/۹)، کاربرد مقادیر بالای ورمی‌کمپوست (۴۳/۲) و محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن با اسید هیومیک (۴۱/۰۳) به دست آمد که در مقایسه با شرایط دیم، عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک، به‌ترتیب از افزایش ۲۹، ۱۹/۶ و ۷/۶ درصدی برخوردار بود (جدول ۶). البته در بین سطوح مختلف محلول‌پاشی، بین کاربرد نانواکسید آهن با کاربرد توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد از نظر شاخص کلروفیل وجود نداشت (جدول ۶). بالابودن دما و کمی نزولات جوی (جدول ۲) به‌دلیل تشدید اثرات ناشی از محدودیت آبی در شرایط دیم، می‌تواند توجیه‌کننده بخشی از کاهش شاخص کلروفیل در شرایط دیم در مقایسه با آبیاری تکمیلی باشد. به نظر می‌رسد که محدودیت آبی ناشی از شرایط دیم با افزایش فعالیت آنزیم کلروفیلاز و تشدید سرعت تجزیه آن، مانع از بیوسنتز کلروفیل شده و می‌تواند میزان کلروفیل را به‌میزان چشمگیری کاهش دهد (Jiao, Chen & Yi, 2010). نتایج مشابهی نیز مبنی بر کاهش شاخص کلروفیل برگ نخود در شرایط دیم در مقایسه با انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی توسط پژوهشگران دیگر گزارش شده است (Barzali, Nasri, & Karimifar, 2016). بخش دیگری از افزایش شاخص کلروفیل در کاربرد ورمی‌کمپوست می‌تواند به‌دلیل وجود عناصر روی، منیزیم، آهن و نیتروژن موجود در آن (جدول ۳) باشد که از عناصر اساسی در سنتز کلروفیل محسوب می‌شوند. تئونیسن و همکاران (Theunissen *et al*., 2010) نیز بالا بودن غلظت آهن و سایر عناصر موجود و مؤثر در ورمی‌کمپوست را، یکی از دلایل اصلی افزایش شاخص کلروفیل گزارش کردند. افتاده فدافن، امینی فرد، بهدانی و مرادی نژاد و همکاران (Oftadeh Fadafen, Aminifard, Behdani, & Moradinezhad, 2018) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست از طریق بهبود فعالیت میکروبی خاک و تولید تنظیم‌کننده‌های رشد گیاه توسط این موجودات و نیز کمک به جذب عناصر غذایی، موجب افزایش شاخص کلروفیل شد. برخی پژوهشگران اظهار داشتند که کاربرد کودهای آلی نظیر اسید هیومیک نیز به‌دلیل افزایش دسترسی به عناصر غذایی به‌خصوص نیتروژن، و یا کمک به بهبود جذب منیزیم و فسفر، موجب افزایش کلروفیل می‌شوند (Nikbakht *et al*., 2008).

اثر تیمارهای مورد بررسی بر عملکرد کوانتومی نیز معنی‌دار بود. بیشترین عملکرد کوانتومی در آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی (۰/۷۸)، کاربرد هشت تن در هکتار ورمی‌کمپوست (۰/۷۸) و محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن با اسید هیومیک (۰/۷۲) به‌دست آمد که در مقایسه با شرایط دیم، عدم کاربرد ورمی‌کمپوست، نانواکسید آهن و اسید هیومیک به‌ترتیب از افزایش ۲۷/۸، ۳۰ و ۹ درصدی برخوردار بود (جدول ۶). در ضمن در بین سطوح مختلف محلول‌پاشی، اختلاف آماری معنی‌داری در سطح احتمال یک درصد بین کاربرد نانواکسید آهن با کاربرد توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک از نظر شاخص کلروفیل وجود نداشت (جدول ۶). بخشی از افزایش عملکرد کوانتومی در کاربرد آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی و ورمی‌کمپوست می‌تواند با تعدیل شرایط ناشی از محدودیت آبی در زراعت دیم و افزایش محتوای نسبی آب (جدول ۶) مرتبط باشد. هرچند که عملکرد کوانتومی تا حدود زیادی نسبت به کم‌آبی مقاوم است (Yordanov, Velikova & Tsonev, 2003)، ولی خشکی می‌تواند با اختلال در انتقال الکترون در واکنش مربوط به تجزیه آب (واکنش هیل) به کاهش عملکرد کوانتومی کمک کرده و کارآیی کوانتومی فتوسنتز خالص را کاهش دهد (Kheirizadeh Arough &

(Seyed Sharifi, 2018). همچنین محدودیت آبی موجب برهم زدن تعادل تغذیه‌ای گیاه و فراهمی مواد غذایی می‌شود، در چنین شرایط تنشی، کاربرد ورمی‌کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک، راهکار مناسبی برای رفع این مشکل بوده و می‌تواند وضعیت رشدی گیاه را بهبود بخشد. در این راستا، برخی محققان اظهار داشتند که نانواکسید آهن با افزایش تولید آنزیم‌های حذف‌کننده رادیکال‌های آزاد، مقاومت گیاه در برابر تنش رطوبتی را افزایش می‌دهد (Narimani, Seyed Sharifi, Khalilzadeh, & Aminzadeh, 2018).

محتوای نسبی آب: مقایسه میانگین اثرات اصلی فاکتورهای مورد بررسی بر محتوای نسبی آب نشان داد که بیشترین مقدار این صفت در آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی (۷۳/۹ درصد)، کاربرد هشت تن در هکتار ورمی‌کمپوست (۷۳/۳ درصد) و محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن با اسید هیومیک (۷۲/۲ درصد) به دست آمد که در مقایسه با شرایط دیم، عدم کاربرد ورمی‌کمپوست، عدم نانواکسید آهن و اسید هیومیک به‌ترتیب از افزایش ۱۲/۱، ۱۰/۲ و ۷/۴ درصدی برخوردار بود (جدول ۶). بخشی از کاهش محتوای نسبی آب در شرایط دیم می‌تواند از کمی نزولات و افزایش دمای محیط (جدول ۲) در طول دوره رشدی ناشی شود که به‌دلیل کاهش جذب آب از ریشه، منجر به کاهش محتوای نسبی آب برگ می‌شود.

جدول ٦- مقایسه میانگین تأثیر ورمی‌کمپوست، محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن بر برخی صفات نخود در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

Table 6- Means comparison of effects of vermicompost, nano iron oxide and humic acid foliar application on some traits of chickpea under rainfed and supplementary irrigation conditions

تیمارها Treatment		شاخص کلروفیل SPAD	عملکرد کوانتومی FV/FM	محتوای نسبی آب RWC (%)	تعداد گره غیرفعال NIN	تعداد گره فعال NAN	وزن خشک گره NDW (mg per plant)	درصد گره فعال PAN	غلاف در بوته NPP	محتوای پروتئین PC (%)
سطوح آبیاری Irrigation levels	دیم Rainfed	36.37b*	0.61b	65.9b	-	-	-	-	13.30b	16.5b
	آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی Supplementary irrigation at flowering stage	46.95a	0.78a	73.9a	-	-	-	-	16.92a	18.02a
LSD		0.64	0.027	2.03	-	-	-	-	0.75	0.58
سطوح ورمی‌کمپوست Vermicompost levels (ton ha^{-1})	صفر	36.1c	0.60c	66.5c	7.4a	8.7c	53.9c	52.9c	13c	15.5c
	4	39.5 b	0.71b	69.8b	6.09b	9.5b	60b	59.1b	15.2b	17.6b
	8	43.2a	0.78a	73.3a	4.9c	10.5a	66.4a	65.3a	17a	18.7a
LSD		0.78	0.0338	2.498	0.44	0.56	2.03	1.58	0.92	0.71
سطوح محلول‌پاشی Foliar application	شاهد Control	38.1 c	0.66 b	67.2 c	9 a	4.92 d	35.7 d	35.1d	11.9 d	14.6d
	اسید هیومیک Humic acid	39.2 b	0.69 ab	69.3 bc	6.9 b	9.39c	57.7 c	57.8c	14.3 c	17.1c
	نانواکسید آهن Nano irin oxide	40.2 a	0.71a	70.6 ab	5.1 c	10.79b	67.9 b	65.6 b	16.2 b	18.6b
	اسید هیومیک + نانواکسید آهن	41.03 a	0.72a	72.2 a	3.4 d	13.36a	79 a	77.9a	17.8 a	18.8a
LSD		0.90	0.03	2.8	0.51	0.64	2.35	1.83	1.07	0.82

* میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

NAN: تعدادگره فعال، PAN: درصدگره فعال، SPAD: شاخص کلروفیل، FV/FM: عملکردکوانتومی، RWC: محتوای نسبی آب، NDW: وزن خشک گره، PC: محتوای پروتئین

* Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at the 5% probability level

SPAD: cholorophyll index; FV/FM: quantum yield; RWC: relative water content; NIN: number of inactive noudules; NAN: number of active noudules; ANP: percentage of active noudles; NDW: noudules dry weight; NPP: number of pod per plant; NGP: number of grain per plant; PC: protein content

جدول ۷- مقایسه میانگین تأثیر ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن بر برخی صفات مرتبط با ریشه نخود

Table 8- Means comparison of effects of vermicompost and nano iron oxide and humic acid on some traits of related to chickpea root

تیمارها Treatment	تعدادگره غیرفعال NIN	تعدادگره فعال NAN	وزن خشک گره NDW (mg per plant)	درصد گره فعال PAN
V1M1	11.47a*	4.006i	0.831f	24.9j
V1 M2	8.17b	8.94g	0.883 ef	53g
V1 M3	6.36cd	10.07ef	0.936de	60.1e
V1 M4	8.85b	12.16bc	1.006c	73.4c
V2 M1	8.85b	4.85hi	0.88 e	35.6i
V2 M2	6.95c	9.67fg	0.973cd	57f
V2 M3	5e	11.04de	0.998c	66.1d
V2 M4	3.59fg	12.63b	1.071b	77.8b
V3 M1	6.92c	5.9h	0.991c	44.8h
V3 M2	5.65de	9.56fg	1.071b	63.4d
V3 M3	4.05f	11.25cd	1.15a	70.5c
V3 M4	2.99g	15.3a	1.208a	82.6a
LSD	0.89	1.11	0.0545	3.04

V: vermicompust; M: foliar application of humic acid+nano iron oxide

* میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری براساس آزمون LSD در سطح احتمال پنج درصد ندارند.

NAN: تعدادگره فعال، NIN: تعداد گره غیرفعال، NDW: وزن خشک گره، PAN: درصد گره فعال

* Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test at the 5% probability level

NIN: number of inactive noudules; NAN: number of active noudules; NDW: noudules dry weight; PAN: percentage of active noudles

ولی انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی ضمن تعدیل دمای گیاه و افزایش آب در دسترس گیاه، موجب افزایش ۱۲/۱ درصدی محتوای نسبی آب شد. به نظر می‌رسد که کاربرد ورمی‌کمپوست به‌عنوان کود آلی مؤثر در جذب آب، با بهبود ساختار خاک و کمک به حفظ رطوبت، منجر به بهبود وضعیت آبی گیاه شد. نتایج مشابهی نیز توسط سایر پژوهشگران مبنی بر افزایش محتوای نسبی آب برگ با کاربرد ورمی‌کمپوست در شرایط محدودیت آبی گزارش شده است (Nazari, Seyed Sharifi & Narimani, 2021).

اجزای پر شدن دانه: تغییرات الگوی نموی بذر در تمامی ترکیبات تیماری از روند مشابهی برخوردار بود (شکل ۱). بدین ترتیب که وزن دانه در مراحل اولیه نمونه‌برداری (۱۴ روز بعد از غلاف‌دهی) کم بوده و با گذشت زمان در تمامی ترکیبات تیماری وزن دانه به‌صورت خطی افزایش یافته و به حداکثر خود رسید، سپس از تغییرات چندانی برخوردار نبوده و به‌صورت یک خط افقی در آمد (شکل ۱). البته میزان افزایش وزن دانه در تمامی مراحل نمونه‌برداری در شرایط کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن) تحت شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی، بیشتر از عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط دیم بود (شکل ۱). روند مشابه با تغییرات وزن دانه در هر یک از اجزای پر شدن دانه (اعم از سرعت، طول دوره و دوره مؤثر پر شدن دانه) در شرایط کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی در مقایسه با عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط دیم مشاهده شد (جدول ۸).

مقایسه میانگین‌ها نشان داد که حداکثر وزن دانه در آبیاری تکمیلی با کاربرد ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی نانواکسید آهن و اسید هیومیک و کمترین آن در شرایط دیم و عدم کاربرد ورمی‌کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک به دست آمد (جدول ۸). بخشی از کاهش وزن دانه در شرایط دیم می‌تواند از کاهش نزولات و افزایش دمای هوا در طول دوره رشدی به‌خصوص دوره پر شدن دانه ناشی شود (جدول ۲) که موجب می‌شود، اثرات ناشی از محدودیت آبی تحت چنین شرایطی در زراعت دیم مضاعف شده و به‌دلیل کاهش طول دوره پر شدن دانه (جدول ۸)، وزن نهایی دانه به‌طور معنی‌داری کاهش یابد. ازآنجا که وزن نهایی دانه به‌وسیله دو عامل سرعت و طول دوره پر شدن دانه تعیین می‌شود (Yang & Zhang, 2006)، ازاین‌رو در شرایط محدودیت آبی ناشی از زراعت دیم، کاهش طول دوره و یا سرعت پر شدن دانه (جدول ۸) و پیری زودرس برگ‌ها، منجر به کاهش تأمین مواد غذایی برای پر شدن دانه و در نهایت کاهش وزن دانه می‌شود (Pashnezhad, Majid Hervan, Nourmohammadi, Sayyadat, & Wazan, 2010). نتایج مشابهی نیز توسط سایر پژوهشگران مبنی بر اینکه تنش‌های محیطی با کاهش طول دوره پر شدن دانه، به‌طور معنی‌داری وزن نهایی دانه را کاهش می‌دهند گزارش شده است (Khalilzadeh, Seyed Sharifi, & Jalilian, 2018).

هادی و همکاران (Hadi, Seyed Sharifi, & Namvar, 2016) اظهار داشتند که در شرایط محدودیت آبی، تعادل تغذیه‌ای گیاه به هم می‌خورد، ولی با محلول‌پاشی عناصر ریزمغذی، این مواد

به سهولت در اختیار گیاه قرار گرفته و با افزایش شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی (جدول ۶) و بهبود شرایط فتوسنتزی و به تبع آن افزایش انتقال مواد تولیدی به دانه‌ها، موجب می‌شود که طول دوره و دوره مؤثر پر شدن دانه (جدول ۸) افزایش یابد. در این زمینه، کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش نظیر ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن به همراه آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی ضمن افزایش وزن دانه، موجب شد که حداکثر وزن دانه، طول دوره سرعت و دوره مؤثر پر شدن دانه به‌ترتیب از افزایش ۵۶/۹، ۶۲/۵، ۵۱/۹ و ۴۴/۶ درصدی در مقایسه با عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط دیم برخوردار باشد. همچنین، تحت شرایط دیم، کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش به‌ترتیب از افزایش ۳۸، ۵۶، ۴۷ و ۳۸/۱ درصدی حداکثر وزن دانه، طول دوره، سرعت و دوره مؤثر پر شدن دانه در مقایسه با عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت همین شرایط از زراعت دیم برخوردار بود. اوک و همکاران (Ouk *et al.*, 2003) اظهار داشتند که تنش خشکی موجب کاهش طول دوره پر شدن دانه می‌شود، ولی با تأمین آب کافی، طول دوره پر شدن دانه بیشتر شد.

جدول ۸- مقایسه میانگین اثر ورمی‌کمپوست، اسید هیومیک و نانواکسید آهن بر اجزای پر شدن دانه و عملکرد دانه نخود در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

Table 8- Means comparison of the effects of vermicompost, nano iron oxide and humic acid on grain filling components and grain yield of Chickpea under rainfed and supplementary irrigation

تیمارها treatment	حداکثر وزن دانه MGW (g)	طول دوره پر شدن دانه GFP (day)	سرعت پر شدن دانه GFR (g day^{-1})	دوره مؤثر پر شدن EGFP (day)	عملکرد دانه GY (kg ha^{-1})
DV1M1	0.186±0.03	21.2±4.8	0.0102±0.002	15.69± 1.7	600.87±37.8
DV1M2	0.214±0.013	31.2±2.1	0.013± 0.0009	19.45±1.35	633.9±30.26
DV1M3	0.242±0.027	32.3±2.2	0.0149±0.001	19.13±1.33	674.48±31.23
DV1M4	0.259±0.017	33.1±2.3	0.015±0.001	20.6±1.43	714.52±32.17
DV2 M1	0.261± 0.023	31.76±2.21	0.014±0.001	18.47±1.29	637.68±30.35
DV2 M2	0.233±0.023	32.83±2.28	0.0149±0.001	20.06± 1.4	673.53±31.2
DV2 M3	0.254±0.012	33.64±2.34	0.015±0.0010	20.41±1.42	706.01±21.35
DV2 M4	0.265±0.012	34.45±2.4	0.0152±0.001	21.11± .47	808.89±33.8
DV3 M1	0.222±0.0179	31.22±2.17	0.0142±0.001	19.78±1.38	670.19±31.12
DV3 M2	0.240±0.016	32.03±2.23	0.0145±0.001	20.1±1.40	735.49±32.67
DV3 M3	0.243±0.0162	32.30±2.25	0.0147±0.001	20.55±1.43	791.57±40.22
DV3 M4	0.258± 0.0251	33.1±2.3	0.015±0.001	21.68±1.51	832.08±22.47
IV1 M1	0.228±0.02	31.49±2.19	0.0145±0.001	20.05± .39	692.19±30.02
IV1 M2	0.245± 0.024	32.3±2.25	0.0149±0.001	20.99 1.46	710.9±32.09
IV1 M3	0.257± 0.015	32.83±2.28	0.0152±0.001	20.73±1.44	745.02±32.9
IV1 M4	0.277± 0.010	33.91±2.36	0.0152±0.001	21.87±1.52	818.27±54.84
IV2 M1	0.236±0.017	31.49±2.19	0.01453±0.001	20.37±1.41	685.92±31.49
IV2 M2	0.261± 0.022	32.3±2.25	0.0149±0.0010	21.8±1.52	739.3±32.76
IV2 M3	0.276±0.012	32.83±2.28	0.0152±0.0010	21.53±1.5	769.81±33.49
IV2 M4	0.252± 0.04	33.91±2.36	0.0152±0.0010	22.02 ±1.5	844.82±22.76
IV3 M1	0.261± 0.0135	33.1±2.3	0.015±0.00105	21.14±1.47	737.78±32.73
IV3 M2	0.275±0.0106	33.64±2.34	0.0152±0.0010	21.72±1 .5	800.31±34.21
IV3 M3	0.270±0.0242	33.91±2.36	0.0152±0.0010	22.10±1.54	842.25±35.12
IV3 M4	0.292±0.010	34.45±2.4	0.0155±0.0011	22.69± .58	942.25±66
LSD	0.0249	2.28	0.001	1.077	26.28

D و I: به‌ترتیب شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی؛ V1، V2 و V3 به‌ترتیب عدم کاربرد و کاربرد چهار و هشت تن در هکتار ورمی‌کمپوست.

M1، M2، M3 و M4 به‌ترتیب محلول‌پاشی با آب به‌عنوان شاهد، محلول‌پاشی با اسید هیومیک، نانواکسید آهن، اسید هیومیک و نانواکسید آهن.

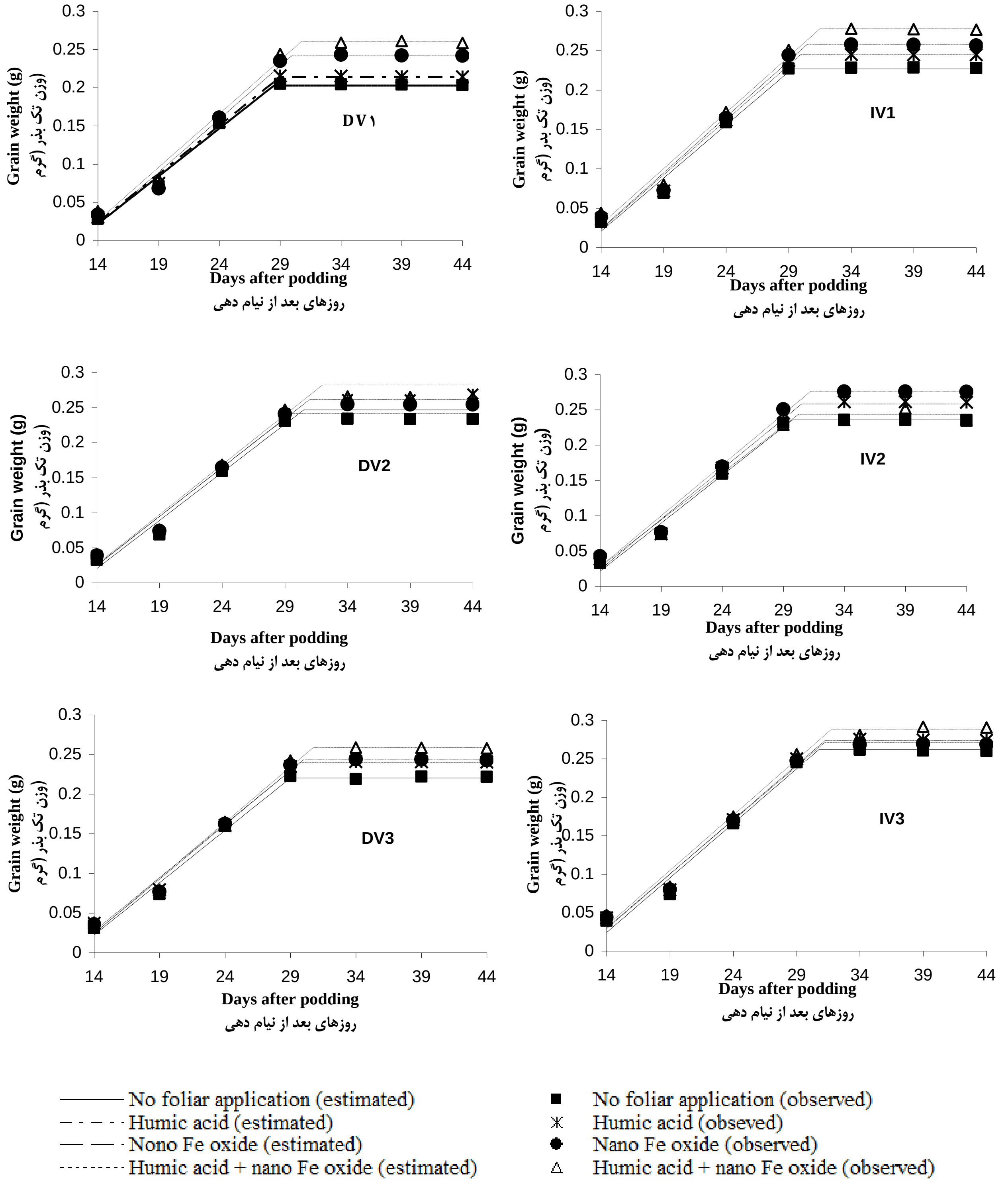
* میانگین‌های با حروف مشابه در هر ستون اختلاف آماری معنی‌داری با هم براساس آزمون LSD ندارند.

GY: عملکرد دانه، EGFP: دوره مؤثر پرشدن دانه، GFR: سرعت پرشدن دانه ، GFP: طول دوره پر شدن دانه، MGW: حداکثر وزن دانه

D and I: are rain-fed and supplementary irrigation ar flowering stage, respectively. V1, V2 and V3: are no application and application of 4 and 8 ton/ha vermicompost. M1, M2, M3 and M4: are foliar application with water as control, foliar application of humic acid, nano iron oxide, foliar application nano iron and humic acid, respectively.

* Means with similar letters in each column are not significantly different based on LSD test.

GFP: grain filling period, GFR: grain filling rate, EGFP: effective grain filling period, GY: grain yield



شکل ۱- تأثیر ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی اسید هیومیک و نانواکسید آهن بر روند تغییرات پر شدن دانه نخود در شرایط دیم و آبیاری تکمیلی

D و I: به‌ترتیب شرایط دیم و آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی؛ V1، V2و V3به‌ترتیب عدم کاربرد و کاربرد چهار و هشت تن در هکتار ورمی‌کمپوست.

Figure 1- Effects of humic acid and nano iron oxide foliar application and vermicompost on trend of changes of grain filling of chickpea under rainfed and supplementary irrigation

D and I are rainfed and supplementary irrigation conditions, respectively. V1, V2 and V3 are no application and application of 4 and 8 ton vermicompost ha^{-1}.

منگ و همکاران (Meng, Yu, Zhao, Zhang, & Shi, 2017) اظهار داشتند که آبیاری در مراحل حساس رشدی می‌تواند از طریق افزایش سرعت فتوسنتز موجب افزایش اجزای پر شدن دانه و انتقال بیشتر ماده خشک تولیدی به‌سمت دانه‌ها شود. بخش دیگری از بهبود اجزای پر شدن دانه در کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش به همراه آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی می‌تواند به اثر این تیمارها بر افزایش شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی (جدول ۶) نسبت داده شود. ازآنجایی‌که کاهش عدد شاخص کلروفیل می‌تواند نتیجه تخریب کلروفیل به‌واسطه محدودیت آبی باشد که به کاهش فتوسنتز خالص منجر می‌شود، ازاین‌رو به نظر می‌رسد که آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی با تعدیل بخشی از کاهش نزولات و افزایش دمای محیط در مرحله پر شدن دانه (جدول ۲) و همچنین کاربرد ورمی‌کمپوست به‌دلیل دسترسی به عناصر غذایی مؤثر در سنتز کلروفیل مانند نیتروژن و منیزیم (جدول ۲)، و نانواکسید آهن به‌دلیل نقش کلیدی این عنصر در بیوسنتز کلروفیل، توسعه کلروپلاست و بهبود فتوسنتز (Feng *et al.*, 2022)، موجب می‌شود که میزان آسیمیلاسیون و نقل‌وانتقال مواد به دانه افزایش یافته و بدیهی است که تحت چنین شرایطی اجزای پر شدن دانه افزایش می‌یابد. جهانگیری‌نیا و همکاران (Jahangiri Nia, Syyadat, Koochakzadeh, Sayyahfar, & Moradi Telavat, 2016) اظهار داشتند که کاربرد ورمی‌کمپوست با افزایش قابلیت جذب آب و دسترسی بهتر به عناصر غذایی توسط گیاه، موجب افزایش شاخص سبزینگی، طولانی کردن دوره انتقال مواد فتوسنتزی به دانه، افزایش سرعت و طول دوره پر شدن دانه و در نهایت عملکرد دانه سویا (*Glycine max* L.) شد. همچنین اسید هیومیک با قدرت کلات‌کنندگی عناصر غذایی و با کاهش تبخیر و تعرق و در نتیجه، قرار دادن آب و مواد غذایی بیشتر و مناسب‌تر در اختیار گیاه، می‌تواند با افزایش ساخت رنگیزه‌ها و بهبود فتوسنتز و متابولیسم گیاهی، انتقال مواد فتوسنتزی را در گیاه آسان‌تر کرده و با بهبود شرایط منبع، موجب دسترسی بهتر مواد پرورده به‌سمت دانه و افزایش وزن دانه شود (Sabouri, Siroosmehr, & Gorgini Shabankareh, 2017).

تعداد دانه در غلاف و غلاف در بوته: تعداد غلاف در بوته تحت تأثیر سطوح آبیاری، ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی، تعداد غلاف در بوته را در مقایسه با شرایط دیم ۲۷/۲ درصد افزایش داد (جدول ۶). به نظر می‌رسد که دلیل اصلی کاهش تعداد غلاف در بوته تحت شرایط دیم، ناشی از افزایش دمای محیط و کاهش نزولات در مرحله گل‌دهی (جدول ۲) باشد که با ایجاد محدودیت در فرآیند فتوسنتزی و تولید مواد مورد نیاز برای بقاء گل و غلاف در طول دوره گل‌دهی، موجب عقیم شدن گل‌ها و ریزش آن‌ها تحت چنین شرایطی شده است. نتایج مشابهی نیز توسط سایر محققان مبنی بر کاهش تعداد غلاف در بوته ژنوتیپ‌های مختلف نخود تحت تنش آبی گزارش شده است (Rahman & Uddin, 2000). کاربرد مقادیر چهار و هشت تن در هکتار ورمی‌کمپوست نیز، تعداد غلاف در بوته را به‌ترتیب ۱۶/۹ و ۳۰/۷ درصد نسبت به عدم کاربرد آن افزایش داد. همچنین محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک، تعداد غلاف در بوته را ۲۸/۷ درصد نسبت به عدم محلول‌پاشی افزایش داد. تعداد دانه در غلاف تحت تأثیر تیمارهای آزمایشی قرار نگرفت و به نظر می‌رسد که علت عدم تأثیرپذیری این صفت، آن است که این صفت بیشتر تحت کنترل عوامل ژنتیکی و کمتر تحت تأثیر عوامل محیطی قرار می‌گیرد.

عملکرد کمّی و کیفی دانه: اثر ترکیب تیماری هر سه عامل آبیاری، کاربرد ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک بر عملکرد دانه در سطح احتمال پنج درصد معنی‌دار بود (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که حداکثر عملکرد دانه (۹۴۲/۲ کیلوگرم در هکتار) در ترکیب تیماری آبیاری تکمیلی با کاربرد ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی نانواکسید آهن و اسید هیومیک به دست آمد که در مقایسه با شرایط دیم و عدم کاربرد ورمی کمپوست و نانواکسید آهن و اسید هیومیک، از افزایش ۵۶/۸ درصدی برخوردار بود (جدول ۸). تحت شرایط دیم، کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش از افزایش ۳۸/۴ درصدی عملکرد دانه در مقایسه با عدم کاربرد این تعدیل‌کننده‌های تنش تحت چنین شرایطی برخوردار بود (جدول ۸). همچنین بدون در نظر گرفتن کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش، آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی به‌تنهایی عملکرد دانه را ۱۵/۲ درصد در مقایسه با شرایط دیم افزایش داد (جدول ۸). بخشی از کاهش عملکرد دانه در شرایط دیم می‌تواند از کاهش نزولات و افزایش دمای هوا در طول دوره رشدی به‌خصوص دوره پر شدن دانه ناشی شود (جدول ۲) که تحت چنین شرایطی اثرات ناشی از محدودیت آبی در زراعت دیم مضاعف شده و به‌دلیل کاهش اجزای دوره پر شدن دانه (جدول ۸)، عملکرد دانه به‌طور معنی‌داری کاهش می‌یابد. بخش دیگری از بهبود عملکرد دانه تحت شرایط دیم با کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش و انجام آبیاری تکمیلی می‌تواند با بهبود برخی صفات مؤثر همانند محتوای نسبی آب، شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی (جدول ۶) و با افزایش تعداد غلاف در بوته مرتبط باشد. در این راستا، پژوهشگران اظهار داشتند که در شرایط محدودیت آبی، کاربرد برخی تعدیل‌کننده‌های تنش همانند ورمی‌کمپوست به‌دلیل افزایش محتوای نسبی آب، محتوای کلروفیل و عملکرد کوانتومی (Heidarpour *et al.*, 2020) و همچنین افزایش توان نگهداری آب در خاک مانع از ریزش اندام‌های زایشی و غلاف‌های

جوان شده و تعداد غلاف در بوته و تعداد دانه در بوته نخود را افزایش می‌دهد (Jat & Ahlawat., 2006). از طرفی، محدودیت آبی با کاهش تحرک برخی عناصر ریزمغذی ضروری در محتوای کلروفیل و فرآیند گره‌زایی ریشه نظیر آهن، موجب کاهش عملکرد دانه می‌شود، درحالی که کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش مانند ورمی‌کمپوست با فراهمی رطوبت در دسترس در طول دوره زایشی و یا محلول‌پاشی با اسید هیومیک (El-Hefny, 2010) از طریق افزایش فتوسنتز جاری و تشکیل گل‌های بیشتر در گیاه، ضمن افزایش تعداد غلاف در بوته (جدول ۶)، در افزایش عملکرد مؤثر خواهد بود. نتایج مشابهی نیز توسط سایر پژوهشگران مبنی بر افزایش عملکرد نخود دیم با کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش گزارش شده است (Armin & Moslehi, 2012; Shabani & Armin, 2017). محتوای پروتئین دانه تحت تأثیر سطوح آبیاری، ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با نانواکسید آهن و اسید هیومیک در سطح احتمال یک درصد معنی‌دار شد (جدول ۵). مقایسه میانگین‌ها نشان داد که انجام آبیاری تکمیلی در مرحله گل‌دهی ۹/۲ درصد محتوای پروتئین را در مقایسه با شرایط دیم افزایش داد. روند مشابهی نیز مبنی بر افزایش ۳۰ و ۱۹/۹ درصدی محتوای پروتئین دانه به‌ترتیب با کاربرد مقادیر هشت و چهار تن ورمی‌کمپوست در هکتار به دست آمد. همچنین محلول‌پاشی توأم نانواکسید آهن و اسید هیومیک منجر به افزایش ۲۸/۷ درصدی محتوای پروتئین دانه نخود نسبت به عدم کاربرد اسید هیومیک و نانواکسید آهن شد (جدول ۶). کاهش شاخص کلروفیل و عملکرد کوانتومی (جدول ۶) ناشی افزایش دما و کاهش نزولات (جدول ۲) در زمان پر شدن دانه تحت شرایط دیم، می‌توانند با اختلال در فرآیند فتوسنتزی و انتقال آسیمیلات‌ها به دانه، منجر به کاهش اجزای پر شدن دانه شود (جدول ۸)، ولی انجام آبیاری تکمیلی و به‌کارگیری تعدیل‌کننده‌های تنش، با افزایش اجزای پر شدن دانه (جدول ۸) می‌تواند به‌دلیل تأمین فرصت کافی برای سنتز و ذخیره محتوای پروتئینی دانه، موجب افزایش محتوای پروتئینی دانه نخود شود.

نتیجه‌گیری

محدودیت آبی یکی از مهم‌ترین تنش‌هایی است که آثار مخربی بر واکنش‌های مختلف فیزیولوژیکی و بیوشیمیایی گیاه داشته و می‌تواند منجر به کاهش عملکرد می‌شود. در این راستا، انجام آبیاری تکمیلی در مراحل حساس رشدی گیاه نظیر مرحله گل‌دهی و کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش نظیر ورمی‌کمپوست، اسید هیومیک و نانواکسید آهن از جمله راهکارهایی است که می‌تواند به‌دلیل بهبود برخی صفات فیزیولوژیکی نظیر محتوای نسبی آب، عملکرد کوانتومی و شاخص کلروفیل، به افزایش مقاومت گیاهان در برابر محدودیت آبی کمک نموده و از کاهش بیشتر عملکرد در شرایط تنش جلوگیری نماید. براساس نتایج این بررسی معلوم شد که کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش (نظیر ورمی‌کمپوست، اسید هیومیک و نانواکسید آهن) به‌تنهایی و یا توأم با یکدیگر قادر بودند که ضمن کمک به بهبود فرآیند گره‌زایی (افزایش وزن و تعداد گره در بوته) و برخی دیگر از صفات فیزیولوژیکی نظیر محتوای نسبی آب، عملکرد کوانتومی و شاخص کلروفیل، به بهبود عملکرد کمّی و کیفی دانه نخود کمک نمایند. به‌طوری‌که استفاده از آبیاری تکمیلی و کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش (ورمی‌کمپوست و محلول‌پاشی با اسید هیومیک و نانواکسید آهن) عملکرد دانه را (۵۷ درصد) در مقایسه با عدم کاربرد تعدیل‌کننده‌های تنش تحت شرایط دیم، افزایش داد. ازاین‌رو به استناد نتایج به‌دست‌آمده می‌توان انجام آبیاری تکمیلی به همراه کاربرد توأم تعدیل‌کننده‌های تنش را مناسب‌ترین ترکیب برای دستیابی به حداکثر عملکرد دانه پیشنهاد نمود، ضمن آنکه انجام آبیاری تکمیلی در دیگر مراحل رشدی نخود به همراه به‌کارگیری سایر تعدیل‌کننده‌های تنش برای ادامه کار پیشنهاد می‌گردد.

سپاسگزاری

بدینوسیله نگارندگان وظیفه خود می‌دانند که مراتب سپاس و قدردانی خود را از مساعدت صمیمانه یکایک همکاران ارجمند در بخش‌های مختلف دانشکده کشاورزی و منابع طبیعی دانشگاه محقق اردبیلی اعلام دارند.

References

1. Abolfazli, B., Alikani, H. A., & Rejali, F. (2017). Evaluating synergistic effects of *Arbuscular mycorrhizal* fungi on symbiotic nitrogen fixation in lentil plant under water stress conditions. *Journal of Soil Biology*, *4*(2), 123-134. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22092/SBJ.2017.109307
2. Armin, M., & Moslehi, J. (2012). Response of yield and yield components of chickpea to time and amount of humic acid. *Modern Science of Sustainable Agriculture Journal*, *4*, 1-9. (in Persian with English abstract).
3. Ayas, H., & Gulser, F. (2005). The effect of sulfur and humic on yield components and macronutrient contents of spinach. *Journal of Biological Sciences*, *5*(6), 801-804. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.3923/jbs.2005 .801.804
4. Baluchi, H.R., Amini, F., Movahedi Dehnovi, M., & Atarzadeh, M. (2016). Effect of different growing organic substrates on growth and yield components of pinto bean (*Phaseolus vulgaris* L.) under heavy metals stress.

Journal of Agricultural Science and Sustainable Production, *26*(2), 57-72. (in Persian with English abstract).
5. Barzali, M., Nasri, M., & Karimifar, M. (2016). Effects of plant density on some growth and physiological responses and activity of antioxidant enzymes in chickpea. *Plant Physiology*, *11*(43), 25-38. (in Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.76712423.1395.11.43.3.0
6. Bakshi Moghadam, F., Mortazavi, S. A., Milani, E., & Hashemi, M. (2015). Evaluation of the diversity of nitrogen fractions and functional characteristics of chickpea protein isolate. *Journal of Innovation in Food Science and Technology*, *5*(4), 93-104. (in Persian with English abstract).
7. DeSouza-Torres, A., Govea-Alcaide, E., Gómez-Padilla, E., Masunaga, S. H., Effenberger, F., Rossi, L. M., López-Sánchez, R., & Jardim, R. F. (2021). Fe_3O_4 nanoparticles and *Rhizobium* inoculation enhance nodulation, nitrogen fixation and growth of common bean plants grown in soil. *Rhizosphere*, *17*, 100275. https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2020.100275
8. El-Hefny, E. M. (2010). Effect of saline irrigation water and humic acid application on growth and productivity of two cultivars of cowpea (*Vigna unguiculata* L.). *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, *4*(12), 6154-6168.
9. Ellis, R. H., & Pieta-Filho, C. (1992). The development of seed quality spring and winter cultivars of barley and wheat. *Seed Science Research*, *2*, 19-25. https://doi.org/10.1017/S0960258500001057
10. Fahad, S., Ahmad, M., Akbar Anjum, M., & Hussain, S. (2014). The effect of micronutrients (B, Zn and Fe) foliar application on the growth, flowering and corm production of gladiolus (*Gladiolus grandiflorus* L.) in calcareous soils. *Journal of Agricultural Science and Technology*, *16*, 1671-1682. https://dorl.net/dor/20.1001.1.16807073.2014.16.7.10.6
11. Feng,Y., Kreslavski, V. D., Shmarev, A. N., Ivanov, A. A., Zharmukhamedov, S. K., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S. I., & Shabala, S. (2022). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*) plants. *Plants*, *11*, 1-15. https://doi.org/10.1071/FP23085
12. Goos, R. J., & Johnson, B. E. (2000). A comparison of three methods for reducing iron-deficiency chlorosis in soybean. *Agronomy Journal*, *92*, 1135-1139. https://doi.org/10.2134/agronj2000.9261135x
13. Hadi, H., Seyed Sharifi, R., & Namvar, A. (2016). *Phytoprotectants and Abiotic Stresses*. Uremia University Press. 342 pp.
14. Hamzei, J., Seyedi, M., Azadbakht, A., & Fesahat, A. (2018). Effect of foliar application of iron on growth, nodulation and quantity and quality of yield of chickpea (*Cicer arietinum*) in Hamedan. *Journal of Crop Ecophysiology*, *12*(3), 427-444. (in Persian with English abstract).
15. Heidarpour, O., Esmaielpour, B., Soltani Toolarood, A., & Khorramdel, S. (2020). Effect of vermicompost on morphophysiological, biochemical and yield characteristics of summer savory (*Satureja hortensis* L.) under different irrigation regimes. *Journal of Agroecology*, *12*(3), 507-522. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAG.V12I3.79634
16. Irmak, S., Nuran Cıl, A., Yucel, H., & Kaya, Z. (2012). The effects of iron application to soil and foliarly on agronomic properties and yield of peanut (*Arachis hypogaea*). *Journal of Food, Agriculture and Environment*, *10*(3 & 4), 417-422. https://doi.org/10.15316/SJAFS.2022.025
17. Jahangiri Nia, E., Syyadat, S. A., Koochakzadeh, A., Sayyahfar, M., & Moradi Telavat, M. R. (2016). The effect of vermicompost and mycorrhizal inoculation on grain yield and some physiological characteristics of soybean (*Glycine max* L.) under water stress condition. *Journal of Agroecology*, *8*(4), 583-597. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22067/JAG.V8I4.51116
18. Jat, R. S., & Ahlawat, I. P. S. (2006). Direct and residnal effect of vermicompost biofertilizers and phosphorus on soil nutrient dynamies and productivity of chickpea–fodder maize sequence. *Journal of Sustainable Agriculture*, *28*, 41-56. https://doi.org/10.1300/J064v28n01_05
19. Jiao, J., Chen, K., & Yi, C. (2010). Effects of soil moisture content on growth, physiological and biochemical characteristics of *Jatropha curcas* L. *Acta Ecologica Sinica*, *30*, 4460-4466.
20. Khalilzadeh, R., Seyed Sharifi, R., & Jalilian, J. (2018). Growth, physiological status, and yield of salt-stressed wheat (*Triticum aestivum* L.) plants affected by bio fertilizer and cystocele applications, *Arid Land Research Management*, 23, 1-17. https://doi.org/10.1080/15324982.2017.1378282
21. Kheirizadeh Arough, Y., & Seyed Sharifi, R. (2018). Effects of bio fertilizers and zinc on yield, variations of quantum yield, stomatal conductance and some physiological traits of triticale (*Triticosecale*) under withholding conditions. *Journal of Process and Function*, *7*(26), 57-74. (in Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.23222727.1397.7.26.14.3
22. Khosravi, H., Daneshvar, M., Hosseini, S. Z., & Mir, Y. (2015). Survey the effects of vermicompost and bio superabsorbent on yield components and physiological characteristics of chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. *Journal of Plant Echophysiology*, *8*(26), 215-229. (in Persian with English abstract).
23. Kostopoulou, P., Barbayiannis, N., & Basile, N. (2010). Water relations of yellow sweet clover under the synergy of drought and selenium addition. *Plant and Soil*, *33*(1), 65-71. https://doi.org/10.1007/s11104-009-0176-x

24. Kreslavskia, V. D., Shmarev, A. N., Ivanova, A., Zharmukhamedov, S. K., Strokina, V., Kosobryukhov, A., Yu, M., Allakhverdiev, S. I., & Shabala, S. (2023). Effects of iron oxide nanoparticles (Fe_3O_4) and salinity on growth, photosynthesis, antioxidant activity and distribution of mineral elements in wheat (*Triticum aestivum*). *Functional Plant Biology*, *50*(11), 932-940. https://doi.org/10.1071/fp23085
25. Maccarthy, P. (2001). The principles of humic substances. *Soil Science*, *166*, 738-751.
26. Mehraban, A. (2017). Effect of foliar application of iron on yield, yield component, and grain protein of lentil crop. *Journal of Plant Environmental Physiology*, *12*(45), 27-37. (in Persian with English abstract). https://dorl.net/dor/20.1001.1.767124 23.1396.12.45.3.1
27. Meng, W., Yu, Z., Zhao, J., Zhang, Y., & Shi, Y. (2017). Effects of supplemental irrigation based on soil moisture levels on photosynthesis, dry matter accumulation, and remobilization in winter wheat (*Triticum aestivum* L.) cultivars. *Plant Production Science*, *20*, 215-226. https://doi.org/10.1080/1343943X.2017.1302307
28. Mohammadi, M., Roozrokh, M., & Talebi, R. (2015) Effect of supplemental irrigation and iron spraying on chickpea genotypes in Kermanshah. *Journal of Plant Ecophysiology*, *8*(27), 113-103. (in Persian with English abstract).
29. Najarian, D., Ghonudi, F., Masoud Sinaki, J., & Valaei, G. (2016). Effect of water stress and vermicompost fertilizer on yield and yield components of cowpea (*Vhgna unguiculata* L.). *Journal of Crop Physiology*, *8*(29), 59-72. (in Persian with English abstract).
30. Namvar, A., Seyed Sharifi, R., Sedghi, M., Asghari Zakaria, R., Khandan, T., & Eskandarpour, B. (2011). Study on the effects of organic and inorganic nitrogen fertilizer on yield, yield components, and nodulation state of chickpea (*Cicer arietinum* L.). *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, *42*(9), 1097-1109. https://doi.org/10.1080/00103624.2011.562587
31. Narimani, H., Seyed Sharifi, R., Khalilzadeh, R., & Aminzadeh, G. (2018) Effects of nano iron oxide on yield, chlorophyll fluorescence indices and some physiological traits of wheat (*Triticum aestivum* L.) under rain fed and supplementary irrigation conditions. *Iranian Journal of Plant Biology*, *10*, 21-40. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22108/ijpb.2018.110895.1098
32. Nazari, G., Seyed Sharifi, R., & Narimani, H. (2021). Effect of mycorrhiza, vermicompost and nano silicon on agronomic and physiological traits of triticale under different intensities drought stress. *Journal of Crop Production*, *14*(4), 21-45 (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22069/EJCP.2022.18925.2413
33. Nikbakht, A., Mohseni, K., Mesbah, B., Xia, Y. P., Ancheng, L., & Nemat, E. (2008). Effect of humic acid on plant growth, nutrient uptake and post harvest life of gerbera. *Journal of Plant Nutrition*, *31*, 2155-2167. https://doi.org/10.1080/01904160802462819
34. Oftadeh Fadafen, A., Aminifard, M. H., Behdani, M. A., & Moradinezhad, F. (2018). Evaluation of 44 nitroxin and vermicompost on quantitative characteristics and photosynthetic pigments of 45 saffron (*Crocus sativus* L.). *Journal of Saffron Research* (*semi-annual*), *5*(2), 163-179 (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22077/jsr.2017.320.1013
35. Ouk, M., Shu, F., Ken, F., Jaya, B., Mark, C., & Harry, N. (2003). *Routine selection for drought resistance in rain fed lowland rice (Oryza sativa L.) in Cambodia*. In: Proceedings of the International Conference on Research on Water in Agriculture, CARDI, Cambodia, 25-29.
36. Pashnezhad, F., Majid Hervan, A., Nourmohammadi, A., Sayyadat A., & Wazan, S. (2010). Evaluation of the effect of drought stress on effective traits on the accumulation of materials in grain of different wheat cultivars. *Agricultural Science*, *13*, 149-137.
37. Rahman, S. M., & Uddin, A. S. M. (2000). Ecological adaptation of chickpea to water stress. *Legume Research*, *23*, 1-8.
38. Ronanini, D., Savin, R., & Hal, A. J. (2004). Dynamic of fruit growth and oil quality of sunflower (*Helianthus annuus* L.) exposed to brief interval of high temperature during grain filling. *Field Crop Research*, *83*, 79-90. https://doi.org/10.1016 /S0378-4290(03)00064-9
39. Sabouri, F., Siroosmehr, A. R., & Gorgini Shabankareh, H. (2017). Effect of irrigation regimes and humic acid solution on some morphological and physiological characteristics of *Satureja hortensis*. *Iranian Journal of Plant Biology*, 9(34), 13-24. (in Persian with English abstract). https://doi.org/10.22108/IJPB.2018.22437
40. Sam Dalire, M., Seyed Sharifi, R., & Esmaelpour, B. (2010). *Pulses Agronomy*. Islamic Azad University Press, Iran. pp. 282. (in Persian).
41. Samiran, R., Kusum, A., Biman, K. D., & Ayanadar, A. (2010). Effect of organic amendments of soil on growth and productivity of three common crops viz. *Zea mays*, *Phaseolus vulgaris* and *Abelmoschus esculentus*. *Applied Soil Ecology*, *45*, 78-84. https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.02.004
42. Shabani, R., & Armin, M. (2017). The effect of foliar application of urea and humic acid in rain-fed conditions on yield and yield components of chickpea. *Journal of Crop Science Research in Arid Regions*, *1*(1), 77-88. https://dorl.net/dor/20.1001.1.2423611.1396.1.1.7.4
43. Soltani, A. (1998). *Application of SAS statistical analysis (in Agriculture)*. Jahad Daneshgahi Mashhad Press, Mashhad, Iran. 188 pp. (in Persian).

44. Soltani, A., Hajjar Pour, A. & Vadez, V. (2016) Analysis chickpea yield gap and water-limited potential yield in Iran. *Filed Crops Research*, *185*, 21-30. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2015.10.015
45. Stone, L. R., Schlegel, A. J. (2006). Yield–water supply relationships of grain sorghum and winter wheat. *Agronomy Journal*, 98, 1359-1366. https://doi.org/10.2134/agronj2006.0042
46. Talebi, R., Ensafi, M. H., Baghbani, N., Karami, E., & Mohammadi, K. H. (2013). Physiological responses of chickpea (*Cicer arietinum*) genotypes to drought stress. *Environmental and Experimental Biology*, *11*, 9-15
47. Theunissen, J., Ndakidemi, P. A., & Laubscher, C. P. (2010). Potential of vermicompost produced from plant waste on the growth and nutrient status in vegetable production. *International Journal of Physiological Science*, *5*(13), 1964-1973.
48. Tuba Bicer, B., Narin Kolenderand, A., & Akar, D. A. (2004). The effect of irrigation on spring-sown chickpea. *Journal of Agronomy Asian Network for Scientific Information*, *3*, 154-158. https://doi.org/10.3923/ja.2004.154.158
49. Yang, J., & Zhang, J. (2006). Grain filling of cereals under soil drying. *New Phytologist*, *169*, 223-236. https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2005.01597.x
50. Yordanov, I., Velikova, V., & Tsonev, T. (2003). Plant responses to drought and stress tolerance. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*, Special Issues, 187-206.